

Pengembangan Kerangka Konseptual Sistem Manajemen Penjadwalan Pengadaan Material Berbasis BIM untuk Proyek Konstruksi

Hardian Wibisono Subarto¹, T.N. Handayani¹, A.S.B. Nugroho¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: tantri.n.h@ugm.ac.id

INTISARI

Keterlambatan pengiriman material dan inefisiensi koordinasi masih menjadi kendala utama dalam industri konstruksi, apalagi dengan kondisi geografis Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan kerangka konseptual sistem manajemen penjadwalan pengadaan material yang terintegrasi dengan Building Information Modelling (BIM) agar material tidak terlambat datang ke proyek. Penelitian ini menggunakan metode kualitatif melalui wawancara semi-terstruktur terhadap praktisi, hasilnya penelitian ini mengidentifikasi adanya gap berupa diskoneksi data antara model 3D BIM dan perhitungan volume oleh *Quantity Surveyor* yang masih berbasis 2D, serta koordinasi yang masih bersifat manual dan periodik. Penelitian ini mengusulkan kerangka konseptual pengembangan sistem manajemen penjadwalan pengadaan material berbasis BIM untuk proyek konstruksi. Sistem ini dirancang untuk mengotomatisasi perhitungan kebutuhan material, mengakomodasi perubahan desain secara dinamis, dan menyediakan dashboard monitoring, sehingga dapat meminimalisir risiko keterlambatan proyek dan duplikasi pekerjaan.

Kata kunci: *Building Information Modelling* (BIM), penjadwalan pengadaan material, integrasi data, efisiensi proyek.

1 PENDAHULUAN

Pembangunan di Indonesia semakin meluas tidak hanya pada kota-kota besar saja, namun mulai merambah ke kota-kota yang memiliki potensi besar untuk berkembang, seperti kawasan-kawasan industri yang dibuat oleh pemerintah dan juga Ibu Kota Nusantara (IKN). Melihat data yang dikeluarkan oleh Badan Pusat Statiska (2024) laju pertumbuhan industri bidang konstruksi untuk nilai pengeluaran bahan/material di Indonesia sebesar 8,93%. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa kebutuhan akan bahan/material terus meningkat seiring berkembangnya industri konstruksi di Indonesia, namun terdapat suatu tantangan dalam pengadaan material karena Indonesia adalah negara kepulauan yang tidak semua daerahnya memiliki sumber material yang dapat memasok setiap proyek yang ada di daerah tersebut bahkan hal ini sudah terjadi sangat lama.

Dampak dari permasalahan ini adalah material terlambat datang ke proyek karena proses pengiriman yang lama yang mana harus dikirim dari daerah di luar proyek itu dibangun. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Sanni-Anibire dkk., (2022) mengatakan bahwa salah satu penyebab utama keterlambatan proyek dalam konstruksi global yaitu keterlambatan dalam pengiriman material, hal ini akan berdampak pada produktifitas di sektor industri konstruksi. Selain itu, permasalahan yang sering terjadi pada proyek konstruksi adalah ketersediaan tempat penyimpanan material proyek. Penyimpanan logistik proyek dapat membantu mengurangi fluktuasi biaya pengadaan dan ketidakpastian dalam permintaan di lapangan Chen dkk., (2024). Pada proyek konstruksi tidak semua proyek memiliki lahan atau gudang logistik yang luas untuk menyimpan seluruh kebutuhan material proyek, maka dari itu diperlukan pengadaan material yang sesuai jadwal agar material tidak tertumpuk di proyek yang mengakibatkan mengganggu mobilitas proyek. Hasil pengamatan dari Pararajasingam dkk., (2024) menyatakan bahwa perencanaan manajemen material yang buruk dalam pengendalian proyek berkontribusi besar pada inefisiensi operasional. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem yang mengatur manajemen material di proyek agar masalah-masalah ini terselesaikan.

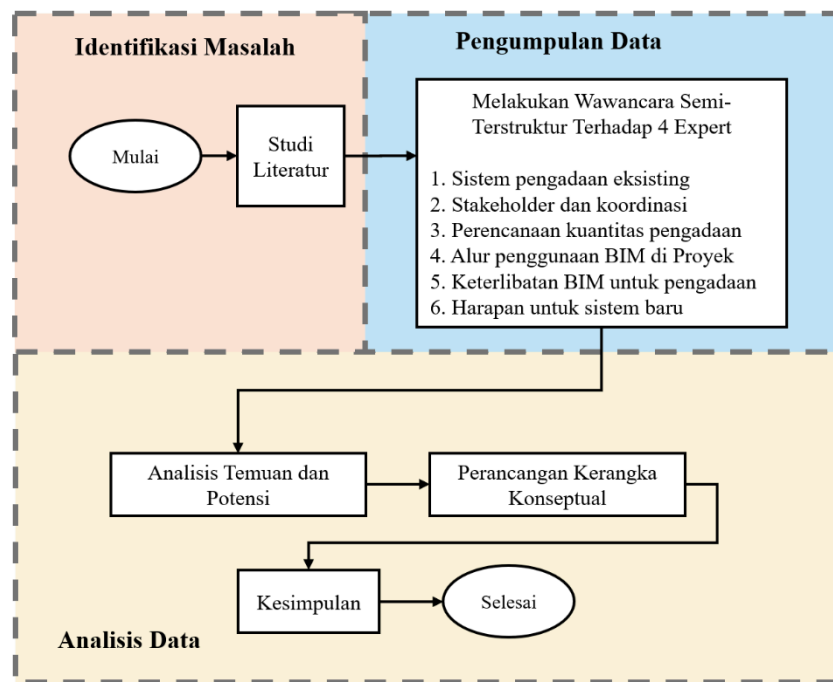
Menurut Pan dan Zhang (2023), *Building Information Modelling* (BIM) telah memberi manfaat kepada proyek mulai dari fase perencanaan dan desain, konstruksi, dan O&M yang masing-masing menyumbang sekitar 55%, 35% dan 10% dari adopsi BIM. BIM diharapkan dapat membantu menyelesaikan permasalahan manajemen material yang sering terjadi di proyek. Sebagaimana dilakukan oleh Jang dkk. (2022) memberikan kontribusi melalui pengembangan sistem manajemen berbasis BIM yang mengelola mulai dari gambar kerja, jadwal, produksi, logistik, pemasangan dan progres monitoring serta progres pembayaran. Namun begitu penelitian tersebut hanya dirancang khusus untuk mengoptimalkan pelaksanaan proyek *Off-Site Construction* (OSC), kontribusi

tersebut berfokus pada integrasi BIM untuk mengatasi tantangan koordinasi logistik dan proses fabrikasi komponen bangunan yang dilakukan secara prefabrikasi di luar lokasi proyek. Kondisi sektor konstruksi di Indonesia masih banyak dilaksanakan menggunakan metode konvensional yaitu melakukan fabrikasi di dalam proyek maka dari itu metode yang digunakan oleh penelitian tersebut tidak dapat digunakan pada proyek di Indonesia pada umumnya.

Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan kerangka konseptual pengembangan sistem manajemen penjadwalan pengadaan material berbasis BIM untuk proyek konstruksi. Sistem ini diharapkan dapat menjadi solusi dalam permasalahan-permasalahan yang sering terjadi mengenai pengadaan material di proyek. Hal ini juga dapat dimanfaatkan oleh konsultan pengawas untuk mendeteksi material telah dipesan atau tidak oleh kontraktor.

2 METODE PENELITIAN

Metode penelitian dapat dilihat pada Gambar 1 berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Proses analisis data kualitatif dimulai dengan merekam dan mentranskripsikan hasil wawancara. Transkrip kemudian direduksi dan dikodekan (*coding*) ke dalam tema-tema yang merepresentasikan kondisi eksisting dan tantangan operasional. Setelah tema terbentuk, peneliti melakukan analisa temuan dan potensi. Hasil dari analisa temuan dan potensi inilah yang kemudian dijadikan landasan logis dalam tahap Perancangan Kerangka Konseptual. Kerangka yang dirancang ditujukan untuk memecahkan masalah diskoneksi data spesifik yang teridentifikasi selama wawancara.

2.1 Pengumpulan data

Pada tahap pengumpulan data dilakukan metode wawancara semi-terstruktur terhadap empat *expert*.

Tabel 1. Profil Responden

Responden	Jabatan	Pengalaman Bekerja	Pendidikan
E1	BIM Engineer	5 Tahun	S1 Teknik Sipil
E2	Staf Pengadaan	7 Tahun	S1 Teknik Sipil
E3	BIM Engineer	4 Tahun	S1 Arsitektur
E4	Staf Pengadaan	7 Tahun	S1 Teknik Sipil

2.1.1 Wawancara semi-terstruktur

Wawancara semi-terstruktur yang dilakukan terhadap empat *expert* dari staf pengadaan dan BIM engineer untuk mengetahui alur pengadaan eksisting yang selama ini digunakan beserta tantangannya dan harapan *expert* terhadap pengembangan sistem baru. Berikut merupakan topik-topik pertanyaan yang ditanyakan pada saat wawancara.

- a) Sistem pengadaan eksisting
- b) Stakeholder dan koordinasi
- c) Perencanaan kuantitas pengadaan
- d) Alur penggunaan BIM di proyek
- e) Keterlibatan BIM untuk pengadaan
- f) Harapan untuk pengembangan sistem baru

2.2 Analisis Temuan dan Gap

Setelah melakukan wawancara semi-terstruktur terhadap empat *expert*, dilanjutkan melakukan analisa hasil wawancara untuk mendapatkan temuan-temuan yang mana akan dilanjutkan dengan analisa gap. Berdasarkan analisa gap yang sudah dilakukan maka dapat mengetahui rencana-rencana yang akan dilakukan.

2.3 Perancangan Kerangka Konseptual

Pada tahap ini menyusun alur sistem yang akan dibuat untuk mengakomodir gap yang telah didapatkan berdasarkan hasil analisa gap.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan temuan pada penelitian ini yang berdasarkan wawancara semi-terstruktur dengan empat *expert*. Wawancara dilakukan untuk mendapatkan analisis kondisi sistem pengadaan material saat ini dan sejauh mana BIM digunakan untuk membantu pengadaan material. Selain itu, dilakukan analisis temuan dan gap setelah itu diusulkan kerangka konseptual sistem manajemen penjadwalan pengadaan material berbasis BIM untuk mengatasi permasalahan yang ada.

3.1 Sistem Pengadaan

3.1.1 Sistem Pengadaan Saat ini

Sistem pengadaan material pada proyek konstruksi memiliki ketergantungan yang tinggi terhadap jadwal pelaksanaan dan birokrasi persetujuan. Berdasarkan wawancara, diketahui bawah terdapat divisi komersil yang bertugas membuat jadwal pelaksanaan. Tabel 2 menguraikan praktik pengadaan saat ini serta tantangan utama yang teridentifikasi dari hasil wawancara.

Tabel 2. Analisis Praktik Sistem Pengadaan Saat Ini

Temuan Lapangan	Risiko dan Hambatan	Referensi <i>Expert</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Jadwal pengadaan material disusun berdasarkan jadwal pelaksanaan dari divisi komersial, divisi ini membawahi QS. • Terdapat batas nilai kontrak pengadaan yang mengharuskan proses persetujuan (negosiasi vendor) melibatkan kantor pusat. • Proyek dengan kontrak <i>design and build</i> selalu ada perubahan desain. 	<ul style="list-style-type: none"> • Skema <i>design and build</i> memiliki dinamika perubahan desain yang sangat tinggi. • Akibat perubahan desain tersebut, divisi pengadaan kesulitan mendapatkan angka pasti (kepastian volume) di awal, sehingga proses pemesanan material ke vendor sering tertunda atau harus direvisi berulang kali. 	E1, E2, E4

Sistem pengadaan saat ini bertumpu pada sinkronisasi jadwal dengan divisi komersial. Namun, tingginya dinamika perubahan desain mengganggu kepastian volume material. Hal ini menuntut sistem pengadaan harus jauh lebih adaptif dan *real time* untuk menghindari keterlambatan kedatangan material.

3.1.2 Stakeholder dan Koordinasi

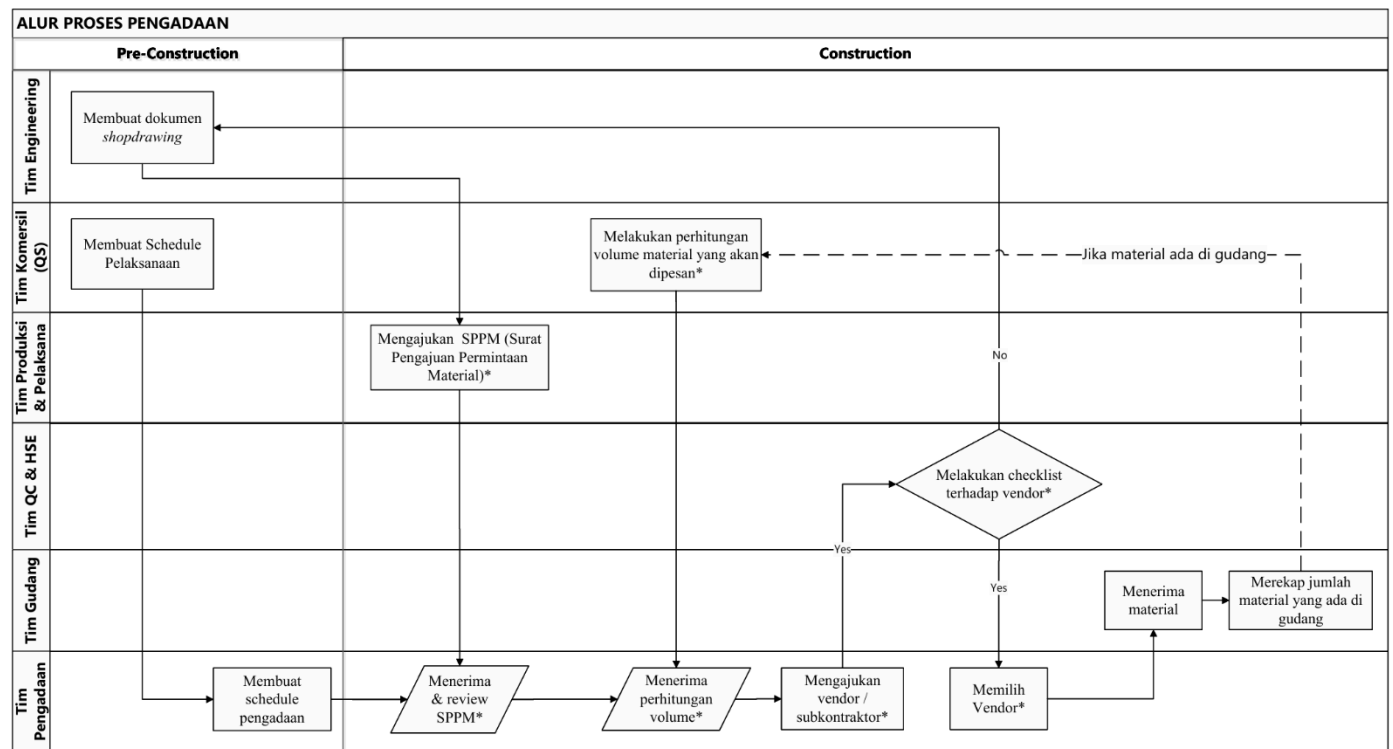
Proses pengadaan merupakan aktivitas lintas divisi. Tabel 3 merangkum bagaimana mekanisme komunikasi antar stakeholder berjalan berdasarkan hasil wawancara.

Tabel 3. Analisis Mekanisme Koordinasi Pengadaan

Temuan Lapangan	Risiko dan Hambatan	Referensi Expert
<ul style="list-style-type: none"> Rapat koordinasi mengenai pengadaan material hanya dilakukan secara periodik (mingguan atau bulanan). Untuk pemantauan harian (stok gudang, status pengiriman vendor), tim proyek sangat mengandalkan grup (<i>WhatsApp</i>) dan pelaporan manual berbasis <i>Microsoft Excel</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> Tidak ada sistem pusat (satu <i>platform</i>) yang menampilkan status pengadaan secara real time. Ketergantungan pada <i>WhatsApp</i> dan input manual memicu risiko <i>human error</i>, tertumpuknya informasi, dan perselisihan data stok material antar divisi. 	E2, E4

Meskipun melibatkan banyak pihak, arus informasi masih terfragmentasi yang berpotensi menyebabkan perselisihan data. Ketiadaan dashboard pemantauan logistik yang terintegrasi secara *real time* mengakibatkan monitoring harian rentan terhadap miskomunikasi, yang berujung dapat terjadi inefisiensi aliran material di proyek.

Berdasarkan analisa terhadap wawancara semi-terstruktur, maka didapatkan alur proses pengadaan yang digunakan saat ini yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Catatan: Pada langkah-langkah yang bertanda (*) dapat dilakukan pada saat pre-construction.

Gambar 2. Alur Proses Pengadaan

Pengadaan material pada proyek dapat dilakukan sebelum proyek berjalan (*pre-construction*) dan saat proyek berjalan (*construction*). Pengadaan pada tahap *pre-construction* penting dilakukan agar pada awal proyek, proyek tersebut dapat produktif dalam melakukan pekerjaan. Oleh sebab itu, pada Gambar 2 alur proses pengadaan dipisah menjadi *pre-construction* dan *construction*.

3.1.3 Perencanaan Kuantitas Pengadaan

Ketepatan jumlah pemesanan material sangat bergantung pada perhitungan faktor keamanan (*safety factor*) dan toleransi terhadap *waste material*. Temuan dari hasil wawancara pada aspek ini dijelaskan pada Tabel 3.

Tabel 4. Analisis Perencanaan Kuantitas Material

Temuan Lapangan	Risiko dan Hambatan	Referensi <i>Expert</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Divisi Komersial (QS) memegang otoritas penuh untuk menghitung volume material, termasuk menentukan persentase waste. • Divisi Pengadaan hanya menerima hasil perhitungan dari QS tanpa mengetahui rincian persentase <i>waste</i> yang digunakan. • Produktivitas pekerja sangat dinamis tiap harinya yang mana mempengaruhi penggunaan material. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ketidakbukaan informasi antar divisi. Karena tim pengadaan tidak tahu rincian <i>waste</i>, mereka kesulitan untuk validasi apakah pesanan material tersebut atau berlebih (<i>overstock</i>) atau bahkan kurang (<i>understock</i>) • Kecepatan pekerja (produktivitas) di lapangan naik-turun setiap hari, sehingga jadwal pengadaan yang sudah dibuat statis di awal sering meleset dari realisasi kebutuhan harian. 	E2, E4

Ketidakterbukaan informasi mengenai perhitungan jumlah materi yang akan dipesan serta fluktuasi produktivitas pekerja di lapangan, penjadwalan material yang disusun di awal menjadi kurang responsif terhadap kondisi aktual konstruksi. Selain itu, hal ini diperburuk dengan karakteristik kontrak proyek *design and build* yang rentan terhadap perubahan desain.

3.2 Penerapan BIM saat ini

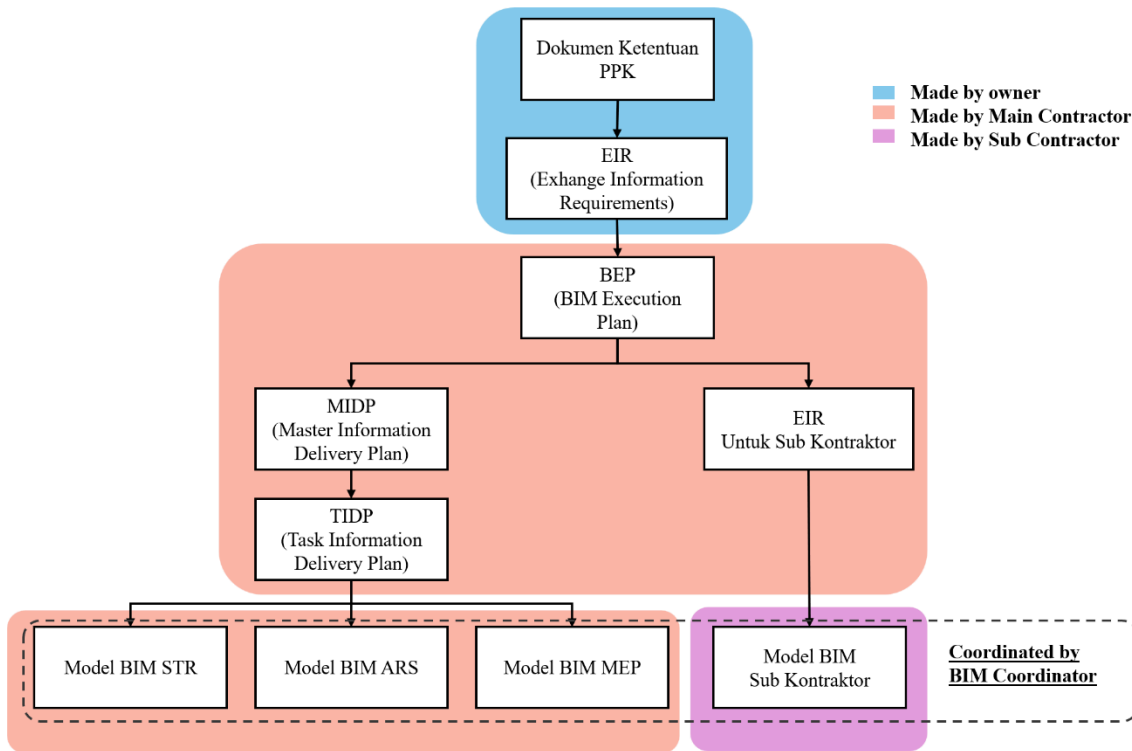
3.2.1 Alur Penggunaan BIM di Proyek

Penerapan BIM pada proyek konstruksi sudah diatur pada dokumen-dokumen seperti EIR (*Exchange Information Requirements*), BEP (*BIM Execution Plan*), MIDP (*Master Information Delivery Plan*) dan TIDP (*Task Information Delivery Plan*). Tabel 5 menjelaskan mengenai tata kelola Bim di tingkat proyek berdasarkan hasil wawancara.

Tabel 5. Tata Kelola BIM

Temuan Lapangan	Risiko dan Hambatan	Referensi <i>Expert</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Model 3D difinalisasi hingga Level of Development (LOD) 350-500 pada tahap konstruksi. • Model 3D dipisah/ disegmentasi per disiplin (Struktur, Arsitektur, MEP) bahkan per sub disiplin agar tidak memberatkan komputer (<i>hardware</i>). • Untuk implementasi BIM secara menyeluruh, sub-kontraktor diwajibkan menyeter keluaran BIM sesuai spesifikasi proyek. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kemampuan teknologi dan SDM Sub-kontraktor masih bervariasi. Seringkali Sub-kontraktor tidak mampu membuat model BIM. Akibatnya, kontraktor utama terbebani karena harus turun tangan membantu proses pemodelan milik Sub-kontraktor. 	E1, E3

Secara prosedural (melalui BEP), alur kerja BIM sudah terstruktur dengan baik. Namun pelaksanaannya di lapangan terhambat oleh keterbatasan *hardware* (yang memaksa model harus disegmentasi) serta kesenjangan literasi digital di tingkat sub-kontraktor, yang pada akhirnya menambah beban kerja *BIM Engineer* kontraktor utama. Berdasarkan hasil wawancara didapatkan alur dokumen BIM yang dapat di lihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Alur Dokumen BIM

3.2.2 Keterlibatan BIM untuk Pengadaan

Hasil wawancara memperlihatkan sejauh mana aset digital BIM yang sudah dibangun/dibuat dimanfaatkan untuk pengadaan material dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6.

Temuan Lapangan	Risiko dan Hambatan	Referensi Expert
<ul style="list-style-type: none"> Proyek sudah menggunakan <i>software</i> BIM 5D (<i>Cubicost</i>), tetapi sebatas untuk material utama saja (beton, besi, bata ringan). Model BIM 3D (LOD 350) yang dibuat oleh BIM Engineer mayoritas hanya dipakai untuk <i>clash detection</i> antar elemen. Divisi komersil yang membawahi QS masih menghitung volume material (QTO) berbasis gambar kerja 2D secara terpisah. 	<ul style="list-style-type: none"> Terjadi diskoneksi data yang antara tim BIM Engineer dan divisi komersial Terjadi pemborosan waktu kerja (duplikasi pekerjaan). QS menghitung/memodelkan ulang secara manual (2D) hal-hal yang sebenarnya datanya sudah tersedia di dalam model 3D (BIM). 	E1, E3

Proyek telah menghasilkan model 3D LOD 350, pemanfaatannya dalam sistem pengadaan sangat minimal. Model BIM belum dijadikan sebagai sumber data utama untuk *Quantity Take-Off* (QTO). Diskoneksi ini menyebabkan duplikasi pekerjaan antara tim *Engineering* dan Komersial, sehingga sangat mengonfirmasi pentingnya pengembangan sistem yang terintegrasi.

3.3 Pengembangan untuk Sistem Pengadaan

Untuk memahami lebih dalam sebagai masukan untuk sistem baru yang akan dibuat, telah dibuat pada Tabel 2 yang berisikan harapan para *expert*. Para *expert* menekankan perlunya *platform* terpusat yang tidak hanya dapat melakukan integrasi data multidimensi seperti jadwal, biaya dan sumber daya tetapi juga tetap dapat diakses oleh pemangku kepentingan yang membutuhkan data tersebut.

Tabel 7. Saran Pengembangan Sistem Pengadaan

Responden	Fokus	Saran Pengembangan Sistem Pengadaan
E1	Integrasi	Sistem harus mendukung kolaborasi untuk mempermudah monitoring pengadaan.
E2	Sentralisasi Data	Seluruh parameter (jadwal, tenaga kerja, material, BOQ) terkoordinasi dalam satu <i>platform</i> .
E3	Aksesibilitas	Model BIM harus dapat dioperasikan secara mandiri oleh pemangku kepentingan khususnya QS (tim komersil) untuk perhitungan volume.
E4	Adaptabilitas	Sistem harus mampu mengakomodir perubahan volume akibat perubahan desain secara dinamis.

3.4 Analisis Potensial BIM

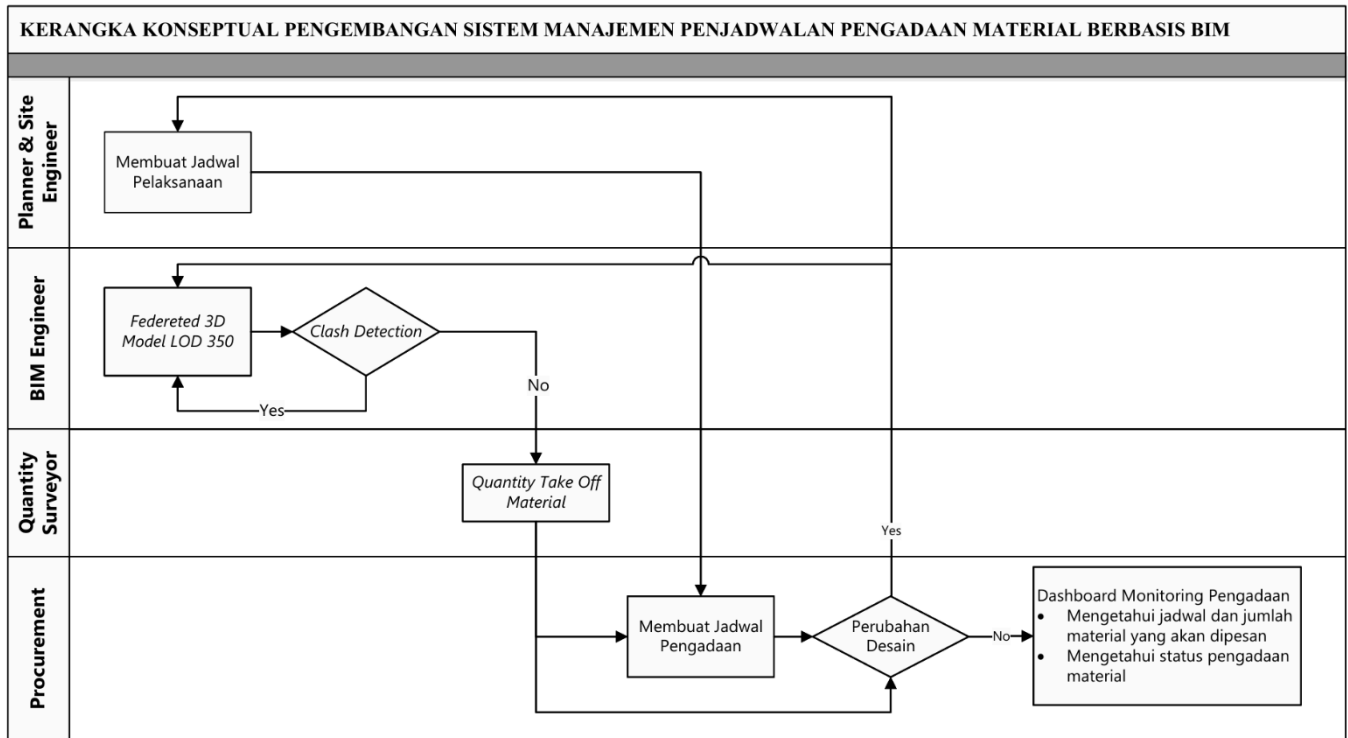
Setelah dilakukan analisis terhadap wawancara yang sudah dilakukan maka didapatkan potensi BIM yang dapat dikembangkan berdasarkan temuan-temuan yang ada.

Tabel 8. Analisis Potensial BIM

Temuan	Sistem Pengadaan Saat Ini	Penerapan BIM Saat Ini	Potensial BIM
Perencanaan Kuantitas Pengadaan	QS menggunakan perangkat lunak <i>Cubicost</i> berdasarkan gambar 2D serta hanya untuk material tertentu saja selainnya masih menggunakan manual.	Tim BIM menggunakan perangkat lunak <i>Revit</i> untuk membuat model 3D (LOD 350-500) yang mana dapat memberikan <i>Quantity Take-Off</i> (QTO)	Menggabungkan Federated 3D Model langsung dengan proses estimasi dapat mempercepat QTO, dan mengurangi human error. (Saavedra dkk., 2025)
Perubahan desain	Perubahan desain merupakan kendala utama yang mengharuskan perhitungan ulang volume pekerjaan.	Model BIM dapat mengecek <i>clash</i> yang terjadi jika ada perubahan desain.	BIM sangat memudahkan dalam mengelola perubahan desain karena dapat mengolah data geometris secara otomatis. (Gouda Mohamed dkk., 2024)
Stakeholder dan Koordinasi	Komunikasi menjadi kendala karena banyaknya pihak yang terlibat serta koordinasi hanya dilakukan secara periodik.	Model BIM hanya digunakan untuk cross-check perhitungan QS pada perhitungan kuantitas pekerjaan yang dianggap membingungkan.	BIM dapat digunakan sebagai sumber data yang valid yang terintegrasi ke sistem pengadaan. Output dari sistem berupa monitoring dapat diakses oleh <i>stakeholder</i> yang membutuhkan. (Zeng dkk., 2024)

3.5 Usulan Kerangka Konseptual

Setelah melihat saran pengembangan sistem pengadaan yang didapatkan dari para *expert* serta potensi BIM yang ada, maka dibuatlah usulan kerangka konseptual pengembangan sistem manajemen penjadwalan pengadaan material berbasis BIM untuk proyek konstruksi.



Gambar 1. Kerangka Konseptual Sistem Baru

Sistem yang dibuat ini menggunakan model BIM yang ada untuk melakukan perhitungan kuantitas yang dilakukan oleh QS, maka model BIM tidak hanya digunakan untuk pengecekan *clash detection*. Selain itu, sistem ini juga dapat mengakomodir jika ada perubahan desain yang mana jika tidak dilakukan dengan sistem ini akan membutuhkan waktu untuk menghitung ulang kebutuhan material untuk desain yang baru. Data QTO dari model BIM dan jadwal pengadaan diproses oleh sistem yang menghasilkan dashboard monitoring pengadaan. Output dari *dashboard* ini dapat mengetahui jadwal pengadaan dan jumlah material yang akan dipesan serta status pengadaan material.

Sistem ini dapat digunakan oleh semua *stakeholder* yang berkepentingan untuk mengetahui hal-hal yang mengenai pengadaan material dengan adanya sistem ini maka koordinasi menjadi lebih mudah. Sistem ini juga dapat mengakomodir empat fokus yang diharapkan oleh expert, yaitu integrasi, sentralisasi data, adaptabilitas dan aksesibilitas.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini mengidentifikasi adanya celah pada alur kerja sistem pengadaan material proyek konstruksi saat ini. Praktik pemodelan 3D (LOD 350-500) oleh *BIM Engineer* belum diimplementasikan secara maksimal oleh *Quantity Surveyor* (QS) yang masih mengandalkan gambar 2D untuk melakukan *Quantity Take-Off* (QTO), hal ini mengakibatkan duplikasi pekerjaan. Masalah lain yang terjadi di proyek konstruksi yaitu inefisiensi koordinasi yang masih bersifat manual dan kerentanan terhadap risiko keterlambatan material akibat perubahan desain apalagi pada proyek dengan skema *design and build*.

Sebagai solusi, penelitian ini berhasil merumuskan kerangka konseptual sistem manajemen penjadwalan pengadaan material berbasis BIM. Kerangka ini didesain untuk memecahkan masalah yang terjadi di lapangan dengan mengakomodir empat harapan *expert* untuk pengembangan sistem pengadaan yang meliputi sebagai berikut:

1. **Integrasi:** Membuat alur kerja interaktif yang menghubungkan pemodelan BIM dengan jadwal pelaksanaan secara *real time*, sehingga mempermudah kolaborasi antar *stakeholder*.
2. **Sentralisasi Data:**
3. **Aksesibilitas:** Memastikan *Federated 3D Model* dapat diakses langsung sebagai basis QTO oleh QS tanpa harus bergantung penuh pada *BIM Engineer* atau gambar 2D.

4. **Adaptabilitas:** Jika terjadi perubahan desain, sistem langsung melakukan *clash detection* dan memperbarui jadwal pengadaan serta volume pengadaan secara dinamis.

Secara konseptual, implementasi kerangka ini dapat meminimalisir keterlambatan proyek, mencegah *overstock* atau kekurangan material, dan mengurangi *waste*. Batasan dari penelitian ini adalah kerangka masih ditinjau dari perspektif kontraktor utama dan bersifat konseptual. Oleh karena itu, sebagai tindak lanjut komprehensif dari studi ini, penulis saat ini sedang mengembangkan sistem yang berbasis BIM sebagai aktualisasi kerangka konseptual ini. Sistem tersebut selanjutnya akan divalidasi dan diaplikasikan pada studi kasus untuk membuktikan efisiensinya secara nyata.

REFERENSI

- Badan Pusat Statiska. (2024). *Konstruksi dalam Angka*.
- Chen, Z., Hammad, A. W. A., & Alyami, M. (2024). Building construction supply chain resilience under supply and demand uncertainties. *Automation in Construction*, *158*, 105190. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105190>
- Gouda Mohamed, A., Alqahtani, F. K., Ismail, E. R., & Nabawy, M. (2024). Synergizing BIM and Value Engineering in the Construction of Residential Projects: A Novel Integration Framework. *Buildings*, *14*(8), 2515. <https://doi.org/10.3390/buildings14082515>
- Pan, Y., & Zhang, L. (2023). Integrating BIM and AI for Smart Construction Management: Current Status and Future Directions. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *30*(2), 1081–1110. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09830-8>
- Pararajasingam, R., Waidyasekara, A. S., & Victar, H. C. (2024). Exploring causes of ineffective material management and impact on successful project deliverables in civil engineering construction projects in Sri Lanka. *Construction Innovation*. <https://doi.org/10.1108/CI-11-2023-0281>
- Saavedra, R., Meléndez, W., & Garcés, G. (2025). Comparative analysis of quantity take-off in concrete, steel bars and formwork in apartment buildings based on CAD and BIM methodologies. *Journal of Information Technology in Construction*, *30*, 159–184. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2025.008>
- Sanni-Anibire, M. O., Mohamad Zin, R., & Olatunji, S. O. (2022). Causes of delay in the global construction industry: A meta analytical review. *International Journal of Construction Management*, *22*(8), 1395–1407. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1716132>
- Zeng, N., Ye, X., Liu, Y., & König, M. (2024). BIM-enabled Kanban system in construction logistics for real-time demand reporting and pull replenishment. *Engineering, Construction and Architectural Management*, *31*(8), 3069–3096. <https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2022-0036>